

D I P L O M A D O

# Eficiencia energética y energías limpias



**OPEN**

OPORTUNIDADES  
DE MERCADO PARA  
ENERGÍAS LÍMPIAS  
Y EFICIENCIA  
ENERGÉTICA

# Introducción

## Análisis exegético y termoeconómico

Por qué es necesario el análisis  
exergético?

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Explicación popular

El análisis exergético se aplica a las corrientes energéticas térmicas de fluidos.

Estas corrientes tienen las siguientes propiedades:

1. La valoración de la energía que contienen es por su cantidad absoluta y no por su calidad, es decir no por la capacidad de uso de la energía que contienen. Esto provoca que corrientes con iguales cantidades de energía tengan diferentes valores de utilidad para las personas. Ej:

Un tanque de 55 galones de capacidad lleno de agua a 40°C tiene una cantidad de energía de :  $Q = 0,2 \text{ m}^3 * 1000 \text{ Kg/m}^3 * 40 \text{ Kcal /Kg} = 8.000 \text{ Kcal} = 9,3 \text{ KW}$ . Con el agua acumulada de este tanque se pueden bañar cerca de 10 personas en clima frío, pero no se puede cocinar alimentos.

Una hornilla eléctrica de 9 KW tiene la posibilidad de recibir 9,3 KWh de energía y entregar 9 KWh de calor con lo que se puede cocinar alimentos para 10 personas en una hora.



# **Por qué es necesario el análisis exergético?**

## **Explicación popular**

**Del ejemplo anterior se observa que iguales cantidades de energía no significan iguales capacidades de ejecución de cualquier trabajo o de satisfacción de cualquier necesidad.**

**La primera ley de la termodinámica no cuantifica la calidad de la energía o su nivel de capacidad de satisfacción de necesidades ( capacidad para realizar cualquier tipo de trabajo).**

**La primera Ley solo cuantifica la cantidad de energía térmica o de fluido y lo hace a través de la propiedad termodinámica ENTALPÍA.**

**La segunda ley cuantifica la capacidad de la energía de realizar cualquier tipo de trabajo y lo hace a través de la propiedad termodinámica denominada EXERGÍA**

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Explicación popular

La exergía se define cuantitativamente como:

$E = I - T_o * S$ , Donde: I- cantidad de la energía térmica o de fluido total de una corriente energética;  $T_o$ -temperatura absoluta del medio con el cual se pondría en equilibrio térmico definitivo la corriente de energía.Ej. Aire  $T_o=273 + 30=303^{\circ}\text{K}$

$T_o*S$ - cantidad de la energía de la corriente que no se puede transformar en trabajo porque se esta utilizando en la entropía de la corriente, o sea , en garantizar el estado de desequilibrio de la corriente con el medio ambiente.

Cuando la corriente se pone en equilibrio total con el medio ambiente entonces su exergía es cero y su entropía es igual a la energía y toma su valor máximo en esa corriente. Ej. Exergía del aire =0

Los procesos en la naturaleza siempre tienden al equilibrio o sea a su valor máximo de entropía, pero no llegan a este de una vez, sino por etapas o transformaciones subsiguientes.

En cada transformación la entropía aumenta y la capacidad para realizar trabajo de la corriente disminuye. Por eso la dirección de todos los procesos es hacia el crecimiento de entropía.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Explicación popular

**El análisis exergético es la parte de la termodinámica que se encarga de identificar las corrientes energéticas por su capacidad para realizar trabajo y no solo por su cantidad de energía total, y también de estudiar los cambios en la capacidad para realizar trabajo de las corrientes energéticas durante sus proceso de transformación, cosa que no hace el primer principio de la termodinámica.**

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Explicación popular

**Cuál es el sentido práctico para la vida de esta rama de la termodinámica?**

- 1. Mejor aprovechamiento de las corrientes energéticas ( no malgastar corrientes energéticas de alta capacidad en usos que requieren baja capacidad Ej. Energía química de combustión en calentar agua; energía eléctrica en calentamiento de baja temperatura.**
  - 2. Selección adecuada de procesos. ( utilizar los procesos que disminuyan lo menor posible la capacidad para realizar trabajo de las corrientes energéticas) Ej. Reducir presión produciendo trabajo y no estrangulando.**
  - 3. Mejor utilización de los recursos energéticos. Los recursos energéticos se deben valorar por su capacidad para realizar trabajo no por sus costos como se hace hoy. El planeta no esta hecho de dinero, sino de recursos y un recurso energético es la capacidad para realizar trabajo de una sustancia.**
- 1. Valorar las pérdidas internas de las corrientes energéticas. En la actualidad solo se valoran las externas. Ej. Perdidas por estrangulamiento; pérdidas por altos gradientes de temperatura y concentración.**

**Veamos algunos ejemplos prácticos mas evidentes !!**

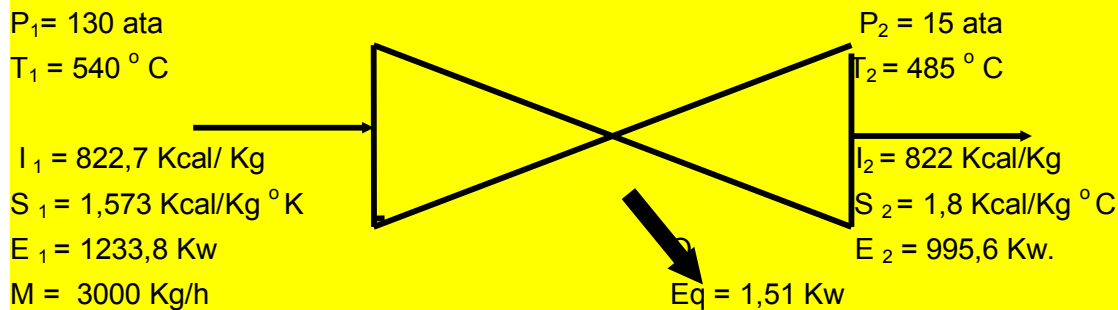
# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Principio de la Degradación de la Calidad de la Energía no-equivalencia de las irreversibilidades o no-equivalencia del valor de la energía

Conocemos el principio de la equivalencia de la cantidad de la energía, ya que por el Primer Principio, esta no se degrada sólo es transformable en sus diferentes tipos. Sin embargo, uno de sus componentes se destruye en los procesos reales.

Veamos un ejemplo ilustrativo:

Tomemos una instalación reductora de presión:



Balance Energético:  $I_1 + Q = I_2$ ,  $Q = I_1 - I_2 = 822,7 - 822 = 0,7 \text{ Kcal / Kg}$

Eficiencia termodinámica:  $N_t = I_2 / I_1 = 822 / 822,7 = 0,99$



# Por qué es necesario el análisis exergético?

Como puede observarse la energía de entrada es prácticamente igual a la de salida y la eficiencia de la instalación es muy alta. Sin embargo, todos sabemos que se ha perdido una gran capacidad para realizar trabajo, ya que el vapor a los parámetros de salida de la estación reductora no es capaz de realizar el mismo trabajo de expansión que el vapor a los parámetros de entrada a la estación.

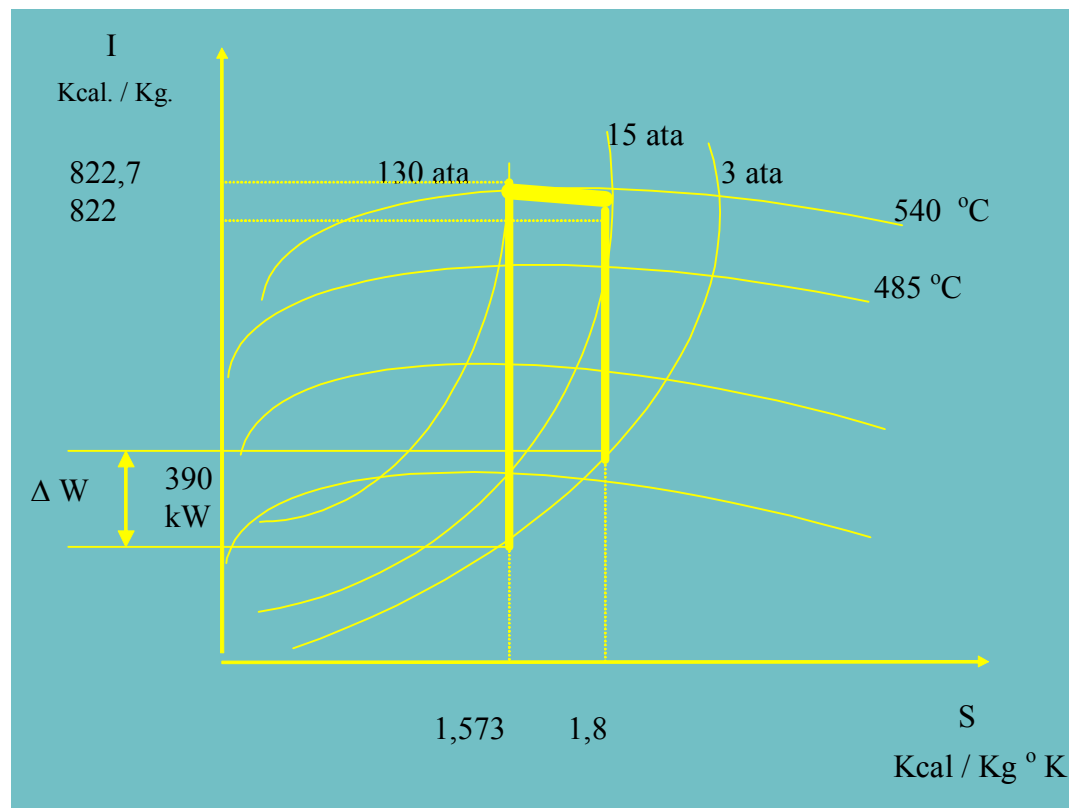
Esta pérdida de capacidad no es reflejada por el análisis energético realizado anteriormente !

**¿Por qué el vapor a los parámetros de salida de la estación reductora no es capaz de producir el mismo trabajo que el vapor a los parámetros de entrada, si ambos tienen prácticamente la misma energía**

$$I_1 \cdot M = I_2 \cdot M ?$$

# Por qué es necesario el análisis exergético?

Simplemente se ha producido un incremento de entropía en el proceso debido a una gran irreversibilidad y el traslado del proceso de expansión hacia las zonas de las altas entropías disminuye el potencial de trabajo, aunque la energía inicial sea la misma, como se muestra en la siguiente figura.



# Por qué es necesario el análisis exergético?

Puede observarse en la figura se ha dejado de producir 390 Kw. de potencia debido al incremento de la entropía del vapor en el proceso de 0,227 Kcal. / Kg. °K.

En el proceso de reducción de los parámetros del vapor se ha conservado la energía pero no se ha conservado su capacidad para realizar trabajo.

**¿Cuál es la causa de este fenómeno?**

Se ha producido una irreversibilidad interna que el análisis energético no detecta ni cualitativa ni cuantitativamente. Observe que el análisis energético si es capaz de detectar y cuantificar la irreversibilidad externa producida por el escape de calor Q hacia el medio.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

Cómo detectar y cuantificar estas irreversibilidades internas “invisibles” a los análisis energéticos o derivados del Primer Principio e la Termodinámica ?

Balance Exergético:  $E_1 = E_2 + E_q + I_r$  ( Irreversibilidad Interna )

$$I_r = 1233,8 - 995,6 - 1,51 = 237 \text{ Kw}$$

$$N_t = E_2 / E_1 = 995,6 / 1233,8 = 0,8$$

Observemos ahora el problema de cuantificar el valor de una corriente de energía según su cantidad.

En el propio ejemplo, si la energía producida antes de la estación reductora tiene un valor de \$12 / 1000 Kg de vapor, la que obtenemos a la salida valdría \$0,99. 12 / 1000 Kg de vapor, sin embargo, cuando la segunda llegue a la turbina deja de producir 390 Kw de potencia eléctrica con respecto a la primera. Esto puede significar una pérdida de \$ 11,7 por cada hora de trabajo de la turbina. Es correcto valorar económicamente ambas energías de esta forma? No. Sería más correcto valorar la energía de salida de la válvula reductora como \$0,8. 12 / 1000 Kg de vapor = \$9,6 / 1000 Kg.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## **Conclusiones:**

- Las irreversibilidades internas no son detectables ni cuantificables por los balances energéticos convencionales.
- A diferencia de la energía, la exergía no se conserva y siempre se destruye en los procesos reales.
- Los índices de evaluación del aprovechamiento de la energía a partir del Primer Principio de la Termodinámica no cuantifican un componente importante de la energía que es su calidad.
- La energía no puede valorizarse por su cantidad, ya que esta no indica su utilidad, sería lógico preciarla por su calidad o valor de uso disponible.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

Cómo se refleja esto en plantas y procesos?

Veamos un ejemplo de esto a partir del trabajo presentado por Reistad sobre una comparación entre las pérdidas energéticas y exergéticas en una planta de generación de vapor a partir de carbón.

Componente	Pérdida de Energía	Pérdida de Exergía
	% de la energía inicial	
Generador de vapor	9	49
Turbinas	0	4
Condensador	47	1.5
Calentadores	0	1.0
Misceláneas	3	5.5
Total	59	61

Como se aprecia, el total de las pérdidas no presenta diferencias significativas pero la distribución de las mismas no presenta marcada incompatibilidad. Por tanto, la dirección en que trabajan los energéticos por mejorar la eficiencia de la instalación también es significativamente distinta. En este diferente punto de vista es donde se encuentra el elemento clave para obtener en la actualidad ideas provechosas en el ahorro de energía. A partir de los resultados del método energético los ingenieros se preocupan por disminuir las pérdidas en el condensador, cuando en realidad las pérdidas de capacidad de trabajo de la sustancia ocurre en el proceso de combustión del generador de vapor.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

Analicemos la comparación entre las eficiencias energéticas y exergéticas de diferentes procesos característicos del desarrollo económico - social actual presentado por Kenney.

**Tabla 2. Comparación entre las eficiencias energéticas y exergéticas de diferentes procesos.**

Unidad de operación o procesos	Eficiencia	
	Primera ley	Segunda ley
Calentador residencial	60	9
Calentador de agua doméstico	40	2-3
Caldera de vapor de alta presión	90	50
Secado de tabaco	40	4
Gasificación del carbón	55	46
Refinación de petróleo	90	10
Regeneración del vapor para uso industrial y social	100	40
Altos hornos	76	46

Es evidente que muchas de estas instalaciones no fueron concebidas a partir de alcanzar altas eficiencias en el aprovechamiento de la calidad de la energía, destacándose especialmente aquellas que utilizan vapor de altos parámetros para procesos de baja temperatura. Sus consecuencias en un gasto innecesarios de combustible que recibe la atmósfera en forma de calor y sustancias tóxicas.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

## Nuevo Enfoque en la Explotación de Plantas

Para la explotación de Plantas, el Principio de la degradación de la exergía o de la no-conservación de su valor de uso, introduce un nuevo enfoque por los siguientes elementos:

- **No basta con conocer durante la explotación donde se pierde la mayor parte de la energía de un proceso, sino que tipo de energía es la que se pierde, la de alta disponibilidad o la de baja disponibilidad, ya que la gestión de la explotación debe estar dirigida a conservar la energía de alta disponibilidad en primer lugar.**

Por ejemplo, si todos los procesos que se producen en una Central Termoeléctrica moderna fueran ideales (reversibles) el consumo de combustible necesario para producir 1 kW sería de 86g, sin embargo, las más eficientes hoy consumen más de 200g.



# Por qué es necesario el análisis exergético?

En el Condensador de una CTE se pierde en cantidad cerca del **50%** de la energía que se suministra con el combustible, pero ello representa sólo el **3%** de la energía útil o disponible, ya que es de muy baja calidad. En el generador de vapor de la propia CTE se pierde en cantidad sólo el **10%** de la energía que entra con el combustible, pero ello representa el **5%** de la energía disponible. Debido a que la energía útil o exergía es la que puedo convertir en Kwh. es mucho más efectivo invertir para recuperar la energía útil en el Generador de Vapor que en el Condensador.

Para recuperar una unidad de energía útil en el Generador de Vapor debo disminuir **1,37** unidades de energía total perdida, mientras que en el Condensador debo recuperar **2** unidades.

- **No es evidente la determinación de los focos de pérdidas internas en un Sistema Térmico, ya que éstas, a diferencia de las externas, no están asociadas a intercambios de calor con el Medio, sino a incrementos de entropía de la sustancia de trabajo que no son censados por instrumentos de medición.**

Para detectarlas y cuantificarlas es necesario la introducción de instrumentos virtuales, cuyos sensores son las metodologías de análisis de generación de entropía y de degradación de la exergía que determinan el lugar y el valor de las pérdidas.

# Por qué es necesario el análisis exergético?

- **Es necesario un cambio radical en lo referente a la evaluación económica de las pérdidas energéticas o inversiones que influyen en la determinación de los costes energéticos y de producción. A la energía térmica total no se le puede asignar un valor unitario fijo, éste depende de la magnitud de su disponibilidad. Para conocer los costos energéticos de cualquier sistema es imprescindible aplicar los métodos de análisis termoeconómico.**

Es una práctica común en las evaluaciones económicas que se efectúan en la industria, asignar a una cantidad de energía térmica ahorrada o gastada en cualquier parte del Sistema, el valor de esa misma cantidad de energía en el vapor producido en el Generador e Vapor, para luego evaluar el ahorro o afectación en combustible. Esta práctica es un error ya que se están considerando de igual valor dos corrientes energéticas de diferente valor de uso o disponibilidad.

**La introducción de estos elementos en los criterios actuales de explotación de plantas están produciendo nuevas tecnologías de monitoreo y optimización de la operación,**

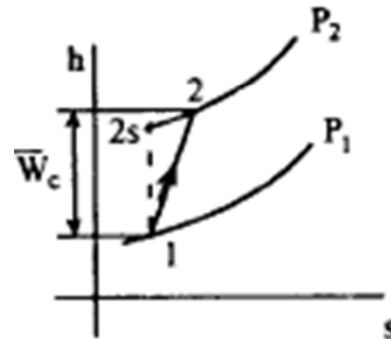
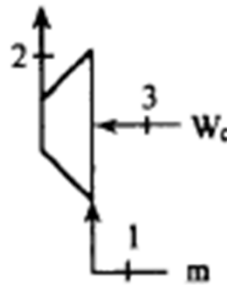
# Por qué es necesario el análisis exergético?

## OTRAS APLICACIONES RECIENTES

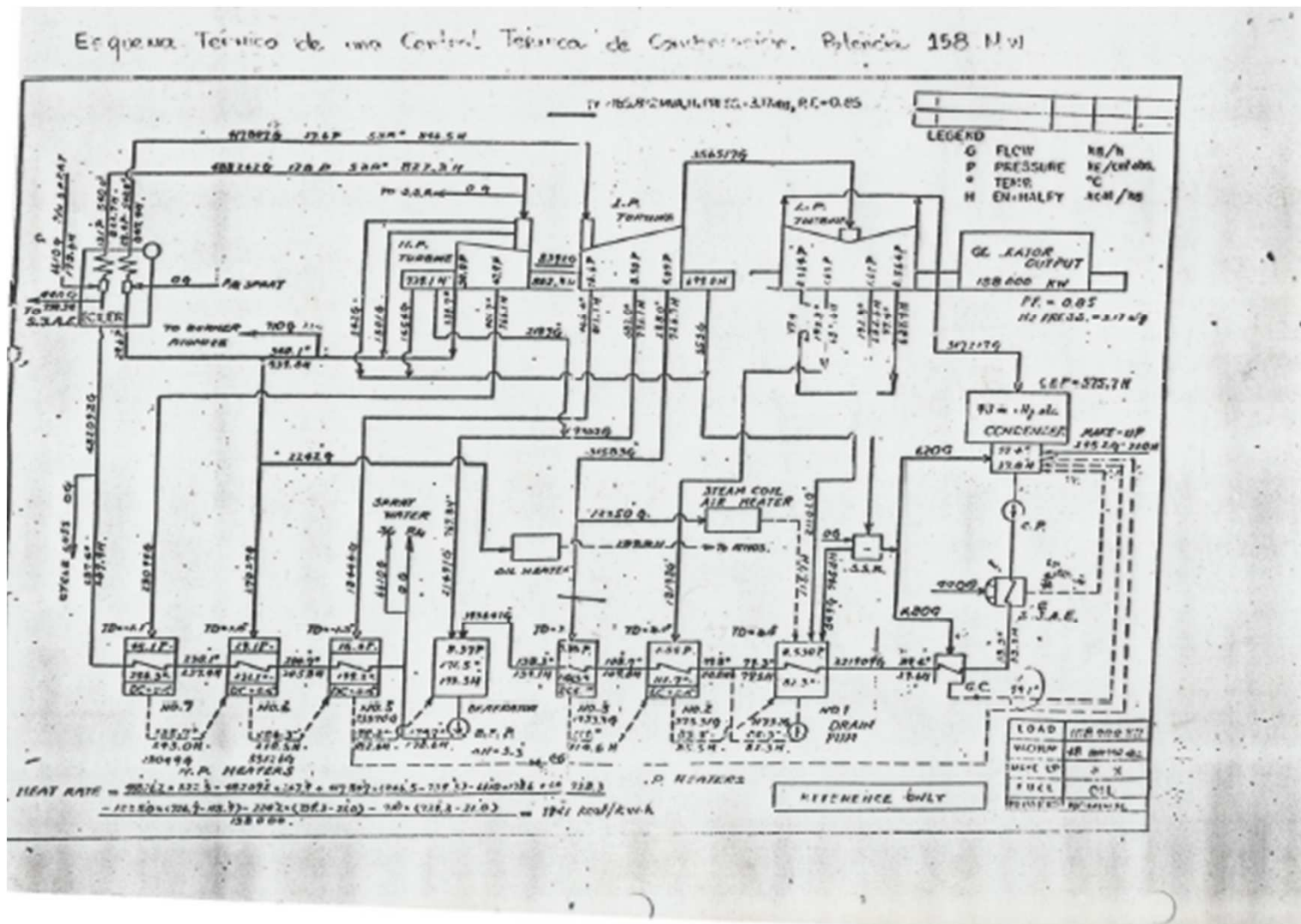
### Identificación de malfunciones en equipos térmicos

Cuando un flujo másico atraviesa un equipo sufre un proceso físico, a lo largo del cual sus propiedades termodinámicas (P, T, h, s, etc.) se van modificando.

$$\theta_{eg} = \frac{h_e - h_g}{s_e - s_g}$$



La aparición de una malfunción intrínseca en un equipo es siempre consecuencia del deterioro de alguno de sus elementos internos, lo que provoca un empeoramiento del comportamiento del mismo. El parámetro interno  $\theta$  es un reflejo del comportamiento del equipo, por lo que es lógico que cuando se produzca una malfunción intrínseca dicho parámetro se vea modificado.



## Resultados análisis de Turbina de vapor 179 MWh

Etapa	entalpia entrada	entalpía de salida	variación entalpía	entropía entrada	entropía salida	variación entropía	Variación entalpía/variación de entropía	Etapas mas ineficientes
1	3437,2	3202,3	234,9	6,57	6,7	0,13	1806,9	1
2	3202,3	3090,3	112	6,7	6,72	0,02	5600,0	6
3	3538,4	3390,4	148	7,39	7,43	0,04	3700,0	3
4	3390,4	3223,2	167,2	7,43	7,47	0,04	4180,0	4
5	3037,6	2853	184,6	7,52	7,56	0,04	4615,0	5
6	2853	2672,7	180,3	7,56	7,635	0,075	2404,0	2

# Qué es la termoeconomía?

Como se ha expresado, hoy se valora en pesos la cantidad de la energía de una sustancia, no la capacidad para realizar trabajo. Ej.

Si yo recupero 1000 BTU/h de condensado que antes se perdían en un proceso, para determinar el valor de lo que recuperé, hoy en la industria se realiza de la siguiente manera:

$$1000\text{BTU} / \text{Efic.} \cdot V_{\text{Cgn}} = 1000 \text{ Btu/h} / 0,89 \cdot 1000\text{BTU/m}^3 \text{ de gn} = 1,12 \text{ m}^3 \text{ de gn/h}$$
$$1,12 \text{ m}^3/\text{h gn} \cdot 600\$/\text{m}^3 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 12 = \$5.824.719/\text{año}$$

Qué hemos realizado en estas operaciones?

1. 1000 BTU/h es la cantidad de energía que hay en el condensado recuperado.
2. Al dividirlo entre la eficiencia de la caldera consideramos que esta energía almacenada en el condensado es igual a la almacenada en el vapor.
3. Al dividirlo entre el valor calórico del combustible hemos considerado que la energía en el vapor es igual a la energía química almacenada en el combustible.

**Qué errores hemos cometido desde el punto de vista del segundo principio de la termodinámica?**

# Qué es la termoeconomía?

## ERRORES

1. Considerar que la cantidad de energía almacenada en el condensado tiene igual capacidad de realizar trabajo que la almacenada en el vapor, siendo que esta energía en el vapor esta a una temperatura y presión muy superior que en el condensado.
2. Considerar que la cantidad de energía almacenada en el vapor tiene igual capacidad para realizar trabajo que su equivalente en energía química la almacenada en el combustible, siendo que la energía química tiene mucha mas capacidad de producir diferentes tipos de trabajo que el vapor.
3. Dar el mismo valor monetario a la cantidad de energía almacenada en los tres tipos de portadores energéticos ( combustible, vapor y condensado)

# Qué es la termoeconomía?

## CUANTO SIGNIFICA EN PESOS ESTE ERROR?

Cuanto vale un BTU en cada portador energético?

### 1. Combustible:

$$\$/\text{BTU} = \$ 17/\text{PC} / 1\,000 \text{ BTU/PC} = 0,017 \$/\text{BTU}$$

### 2. Para el vapor:

A 150 psig saturado:

Supongamos el costo de producción del BTU de energía de vapor en 0,02\$/BTU. ( gas mas operación y mantenimiento, depreciación del equipo etc..)

Cuanto es el costo del BTU de exergía?

$$\text{Exergía en 1 lb de vapor} = 1194,5 \text{ BTU/lb} - 545,4 \text{ }^\circ\text{R} * 1,57 \text{ BTU/lb}^\circ\text{R} = 338,222 \text{ BTU/lb}$$

$$\text{Relación Exergía/ Energía en vapor} = 338,22 \text{ BTU/lb} / 1194,5 \text{ BTU/lb} = 0,283$$

$$\text{Valor de un BTU de exergía} = 0,02 / 0,283 = 0,07 \$/\text{BTU exergía}$$

$$\begin{aligned} \text{Valor de 1000BTU/h de energía recuperado en vapor} &= 0,07 \$/\text{BTU exergía} * 1000 \text{ BTU} \\ \text{energía/h} * 0,283 * 9792 \text{ h/año} &= \mathbf{\$ 193.979,52 /año} \end{aligned}$$

### 3. Para el condensado:

A 100°C líquido saturado.

$$\text{Exergía} = 181,2 \text{ BTU/lb} - 545,4 \text{ }^\circ\text{R} * 0,31 \text{ BTU/lb}^\circ\text{R} = 12,126 \text{ BTU/h}$$

$$\text{Relación Exergía/Energía en condensado} = 12,126 \text{ BTU/h} / 181,2 \text{ BTU/lb} = 0,066$$

$$\begin{aligned} \text{Valor de 1000BTU/h de energía recuperado en condensado} &= 0,07 \$/\text{BTU} * (1000 \text{ BTU/h}) * \\ 0,066 * 9792 \text{ h/año} &= \mathbf{45.239,04 \$ /año} \end{aligned}$$



# Qué es la termoeconomía?

## CUANTO SIGNIFICA EN PESOS ESTE ERROR?

- Realmente en energía disponible en 1000 BTU/h de condensado recuperamos 45.239,04 \$/año. Anteriormente con los cálculos actuales habíamos determinado que el valor era 5.824.719 \$ /año.
- En el condensado la energía disponible en 1000 BTU es 12,12 BTU; el 6,6%. En el vapor es 338 BTU , el 28,3%, en el gas natural es 1000 BTU el 100%.
- El error se produce por considerar de igual valor monetario los 1000 BTU, almacenados en diferentes forma de energía: condensado, vapor y gas natural.
- Note que el valor en pesos de una unidad de exergía es constante para la misma corriente energética

# Qué es la termoeconomía?

La termoeconomía es la parte de la termodinámica que permite realizar la valoración de la energía por su capacidad para realizar trabajo y no por su cantidad.

Presupone determinar la capacidad de realizar trabajo de la sustancia en cada punto de nuestro sistema.

Presupone asignar un valor de costo a la capacidad de realizar trabajo de cada corriente.

El valor del costo de la unidad de capacidad de realizar trabajo es constante en toda la corriente.



D I P L O M A D O

# Eficiencia energética y energías limpias

Programa OPEN - Cámara de Comercio de Bogotá